

Fremdkörperdetektion im Maisfeld



Ein Auszug aus dem Stand der Forschung

Autorin: Helena Wenzel, M.Sc.,

Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Biomasse-Institut

Im Auftrag von: Prof. Dr. Patrick Ole Noack, Professor für Agrarsystemtechnik der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf; Dr. Nicolas Alt, geschäftsführender Leiter des Biomasse-Instituts

Oktober 2019

Inhalt

1	Einleitung.....	3
2	Derzeitige Fremdkörperdetektion im Maishäcksler.....	4
3	Entwicklungen und Untersuchungen zur Fremdkörperdetektion im Maishäcksler	4
3.1	Fremdkörperdetektion mittels Röntgenstrahlung	4
3.2	Fremdkörperdetektion mittels elektromagnetischer Wellen	6
3.2.1	Störkörper Sensierung durch Dielektrika-Diskriminierung - EN 1808 Metallsensor	6
3.2.2	Projektarbeit: Fremdkörpererkennung im simulierten Maisbestand mittels Radartechnologie bei 24 GHz	8
3.2.3	Untersuchung zur Fremdkörpererkennung im Maisfeld mittels Radartechnologie bei 1 - 4 GHz 10	
3.2.4	Exkurs Radartechnik	12
3.3	Fremdkörperdetektion mittels Wirbelstromtechnik.....	13
3.3.1	Wirbelstromtechnik.....	13
3.3.2	Erkennung von Edelstahl im Maisfeld und an der Maschine mittels Metalldetektor...	13
3.3.3	Integration eines Metalldetektors in die Feldspritze oder den Leichtstelzenschlepper	14
4	Entwicklungen zur Detektion von Minen im Boden.....	15
4.1	Radartechnik zur Minensuche.....	15
4.1.1	Minensuche mittels eines tragbaren Systems	15
4.1.2	Minensuche auf dem Gelände mit größerem Flächendurchsatz.....	15
4.1.3	Minensuche mittels Radar-Drohne	16
4.2	Wirbelstrom zur Minensuche.....	17
5	Diskussion.....	17
5.1	Fremdkörperdetektion mittels Röntgenstrahlung.....	17
5.2	Fremdkörperdetektion mittels Radarstrahlung	18
5.3	Metallsuchtechnik zur Fremdkörpererkennung im Mais.....	19
5.4	Vor- und Nachteile der möglichen Detektionsmethoden zusammengefasst	19
6	Danksagung	20
7	Literaturverzeichnis.....	20

1 Einleitung

Pflanzliche Erzeugnisse von Acker- und Grünland werden zur Ernährung von Mensch und Tier oder für die Energienutzung verwendet. Die Lebensmittelindustrie, sowie die Land- und Energiewirtschaft haben ein großes Interesse an fremdkörperfreien organischen Ernteprodukten. Fremdkörper aus den unterschiedlichsten Materialien können zu massiven Behinderungen und Schädigungen in der jeweiligen Verwertung führen und das Leben von Mensch und Tier gefährden.

Bei den hohen Kräften und Geschwindigkeiten, die während des Ernteprozesses in der Maschine herrschen, können schon kleine massive Teile, die in die Maschine gelangen enorme Schäden hervorrufen, die einen hohen finanziellen Aufwand für Reparaturkosten und Ausfallzeiten mit sich führen. Zudem können die Fremdkörper selbst oder herausgelöste Fahrzeugteile zu gefährlichen Geschossen werden, die direkt das Leben und die Gesundheit bedrohen. Platzierte Antibiotikapäckchen, welche zusammen mit dem Mais in die Biogasanlage gelangen, können den Gärprozess und damit auch die Biogasproduktion der Anlage negativ beeinflussen. Gelangt ein Kadaver zum Futtermais, kann dies schwere Vergiftungen bei den Tieren verursachen, genauso wie Plastik und Glas die Gesundheit der Tiere gefährden kann.

Die immer wieder auftretenden Sabotagefälle an Maishäckslern, bei denen vorsätzlich Edelstahl im Feld platziert wird, konnten bisher nicht verhindert werden. Durch geeignete Messtechnik könnte jedoch der Schaden abgewendet werden, indem der Fremdkörper gefunden und entfernt wird bevor er die Häckseltrommel im Maishäcksler erreicht.

Nachteilig bei den derzeitigen Detektionssystemen ist, dass sie nicht alle vorkommenden und maschinen- und ernteschädigenden Fremdkörper detektieren können. Absichtlich platzierter Edelstahl oder Tierkadaver, arglos weggeworfener Glas- und Plastikabfall können nachzeitigem Stand der Technik während des Erntevorgangs nicht detektiert werden.

Mögliche Detektionsorte

Wie in den derzeitigen Maishäckslern, ist ein möglicher Detektionsort der Einzugskanal im Maishäcksler zwischen den Vorpresswalzen. Die Herausforderung hier ist, den Fremdkörper zwischen einem 20 x 60 cm dicken dichten Maispaket zu detektieren. Gleichzeitig umgeben das Maispaket rotierende Walzen aus Edelstahl und ein Metallgehäuse. Erschwerend kommen die Vibrationen des Motors und der sich bewegenden Teile des fahrenden Häckslers hinzu. Der Vorteil einer Detektion im Einzugskanal ist die geringe Fläche von ca. 0,12 m², welche zu erfassen ist.

Eine weitere Möglichkeit ist die Detektion im Voraus, bevor ein Fremdkörper in die Maschine gelangt. Dies kann durch ein Detektionssystem realisiert werden, welches z.B. am Häcksler, an einer Drohne oder an einem vorausfahrenden Gestell angebracht ist. Der Nachteil hier ist, dass eine eher große Fläche von der Breite eines Häckslers (ca. 6 m) und der Höhe der Maispflanzen (3-4 m) zu erfassen ist. Der Vorteil für den Landwirt ist, dass der Fremdkörper entfernt werden kann, bevor er in die Maschine gelangt, wodurch er möglicherweise leichter nach der Detektion zu finden ist.

2 Derzeitige Fremdkörperdetektion im Maishäcksler

Die meisten Feldhäcksler sind standardmäßig mit einem Metall- und Steindetektor ausgestattet, da das Häckselwerk durch Metalle oder Steine beschädigt werden kann. Der Metalldetektor erkennt ferromagnetisches Metall im Erntefluss zwischen den rotierenden Maschinenelementen. Bei fast allen Herstellern befindet sich der Metalldetektor in einer der Messertrommel vorgeschalteten Zuführwalzen, welche aus nicht magnetisierbarem Stahl bestehen. Mit Permanentmagneten wird ein Magnetfeld erzeugt, welches den Erntegutdurchflussbereich durchdringt (*Abbildung 1*). Die Spulen induzieren eine Spannung. Passiert ein magnetischer metallischer Fremdkörper das Magnetfeld, erfolgt eine Spannungsänderung. Ist die verstärkte und gefilterte Signalspannung größer als eine einstellbare Schwellwertspannung, wird ein Stoppsignal erzeugt und der Antrieb der Zuführwalzen angehalten. Der ferromagnetische Fremdkörper kann ungefähr geortet werden, indem angezeigt wird, welche der Spulen das Stoppsignal erzeugt hat (Patent Weiß, B., & Schulze, K. (1997); Patent Johnson, S. J. (1996)).

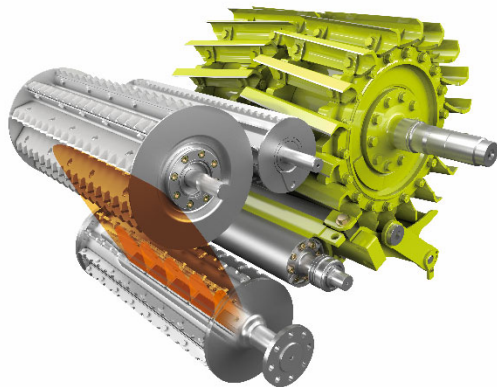


Abbildung 1: Ort der Metalldetektion (rot) an den Vorpresswalzen (grau), vor der Häckseltrommel (grün), Bild: Claas.

Der Steindetektor funktioniert mittels eines Pendelsensors. Sobald die Vorpresswalzen eine Beschleunigung durch einen harten Widerstand erfahren und schlagartig hochfahren, wird ein Pendelsensor beschleunigt, der das Abschalten bewirkt.

3 Entwicklungen und Untersuchungen zur Fremdkörperdetektion im Maishäcksler

3.1 Fremdkörperdetektion mittels Röntgenstrahlung

In einem dreijährigen Verbundprojekt entwickelte das Zentrum für angewandte Forschung und Technologie e.V. (ZAFT) an der HTW Dresden, zusammen mit den Projektpartnern John Deere und Rayonic, ein System zur Durchsatz- und Fremdkörpererfassung im Feldhäcksler auf Röntgenbasis. Gefördert wurde das Projekt durch die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE). Es wurden mehrere Prüfstände entwickelt, darunter die in *Abbildung 2* dargestellten. Diese dienen zur Untersuchung der Durchsatz- und Fremdkörpermessungen mittels Röntgenstrahlen und bilden die Grundlage zur robusten Integration der sensiblen Sensorik in die Erntemaschine (*Abbildung 3*) (John Deere GmbH & Co. KG, 2015); (Wild K. , 2016).

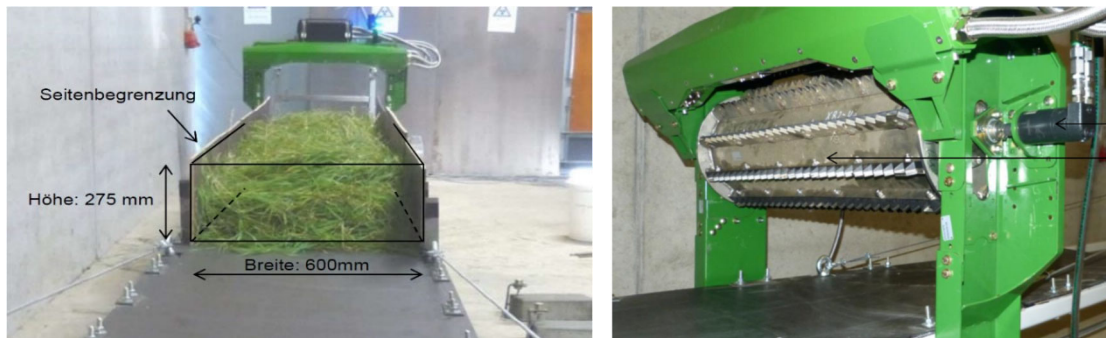


Abbildung 2: links: Prüfstand mit Messkanal entsprechend den Maßen des Eingangsbereiches am Einzugskanal eines Feldhäckslers, rechts: Prüfstand mit Förderwalze (Wild K. , 2016).

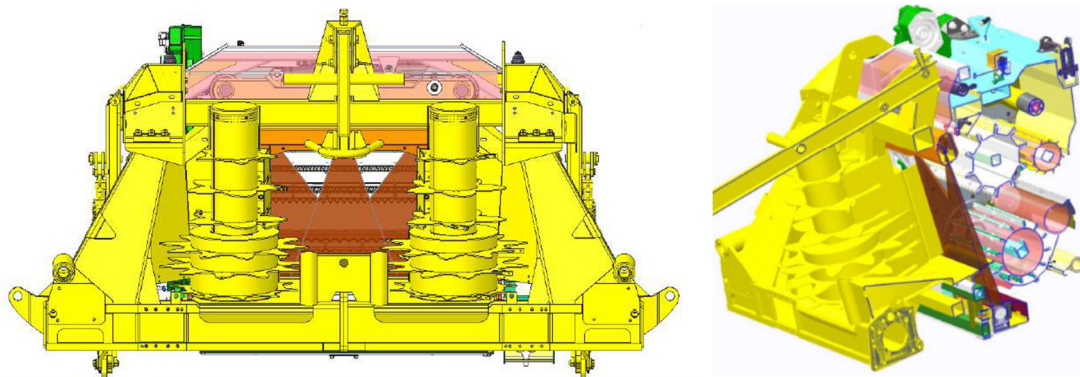


Abbildung 3: Integration der drei Röntgenröhren in den Einzugskanal, braun gekennzeichnet ist der röntgendurchstrahlte Bereich (John Deere GmbH & Co. KG, 2015).

Mit dem entwickelten System konnten ferromagnetische und nichtmagnetische Metalle, Steine, Glas, Plastik und ein simulierter Kadaver erkannt werden. Allerdings gab es Einschränkungen bei kleineren Gegenständen, wie Nägeln < 6 mm im Durchmesser oder Steinen < 20 mm. Das Messprinzip basiert auf der Absorptionsmessung. Wie stark die Röntgenstrahlung in ihrer Intensität gemindert wird, wird im Wesentlichen durch die Art des durchstrahlten Materials, dessen Dichte und der durchstrahlten Wegstrecke bestimmt. Das Material bewirkt eine Änderung der Ausgangsspannung des Ionisationsdetektors. In *Abbildung 4* ist die Ableitung der Ausgangsspannung des Ionisationsdetektors mit und ohne Fremdkörper im Viehfutter dargestellt. Um Falschalarme durch verdichtetes Pflanzenmaterial zu vermeiden (*Abbildung 4*, erster negativer Ausschlag), muss ein Schwellenwert eingestellt werden, der wiederum zur Folge hat, dass Fremdkörper die eine geringere Änderung der Ausgangsspannung auslösen nicht erkannt werden.

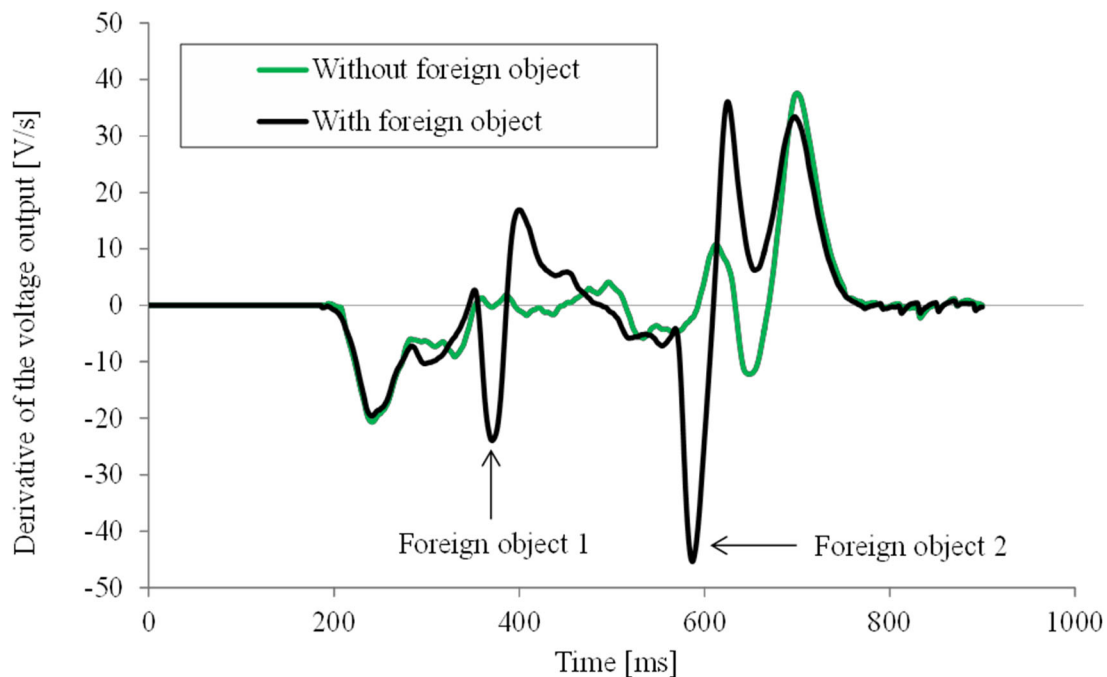


Abbildung 4: Ableitung der Ausgangsspannung des Ionisationsdetektors mit und ohne Fremdkörper. Als Fremdkörper dienten zwei Schnapsgläser unterschiedlicher Größe. Foreign object 1: \varnothing 34-50 mm, h: 68 mm; Foreign object 2: \varnothing 50 mm, h: 125 mm (Wild & et al., 2015).

Zum Strahlenschutz von Personen wurden Abschirmblenden angebracht und ein behördlicher Gutachter genehmigte die Inbetriebnahme der Röntgenanlage. Bei Inbetriebnahme des Feldhäckslers mit Röntgenanlage ist in einem Meter Entfernung eine Strahlung von $15 \mu\text{Sv/h}$ messbar. Die Exposition der Ernte beträgt weniger als 10 ms und ist im Vergleich zur natürlichen Strahlung, welche durchschnittlich $2,1 \text{ mSv/Jahr}$ in Deutschland (Bundesamt für Strahlenschutz) beträgt, vernachlässigbar (Wild & et al., 2015). Der Grenzwert in Deutschland beträgt 20 mSv/Jahr (Bundesamt für Strahlenschutz). Bis zur Erreichung dieses Grenzwertes kann der Häckslers über 1000 Stunden in Betrieb genommen werden.

Zur Akzeptanz einer solchen Anlage befragte John Deere potentielle Kunden mit dem Ergebnis, dass weniger als ein Viertel der fast 100 Befragten Bedenken bezüglich der physiologischen Wirkung der Strahlung auf den Maschinenbediener sowie einer möglichen Schädigung des Futters hatten. Auch kann die Akzeptanz durch Aufklärung gesteigert werden (John Deere GmbH & Co. KG, 2015). Zum Detektionsvermögen der Anlage heißt es im Abschlussbericht des Projekts, dass zur Erkennung kleiner Fremdkörper eine höhere Auflösung des Detektors sowie für ein fertiges Produkt weitere Entwicklung notwendig sei (Wild K., 2016); (John Deere GmbH & Co. KG, 2015).

3.2 Fremdkörperdetektion mittels elektromagnetischer Wellen

3.2.1 Störkörper Sensierung durch Dielektrika-Diskriminierung - EN 1808 Metallsensor

Herr Peter Prendel der Firma SensKom arbeitet derzeit daran, mittels elektromagnetischer Wellen Fremdkörper zu detektieren, bevor sie an kritische Stellen der Maschine gelangen. Das System arbeitet bei 5 GHz und erkennt alle Metalle, Steine, Keramik und Glas. Es besteht aus einem Sender in Verbindung mit einer breitbandigen Empfangsanordnung. Die Fremdkörper bewirken durch

Absorption, Beugung bzw. Reflexion der Sendefrequenz eine Veränderung der Empfangs-Situation bei den lokalen Sensorpunkten.

Der Sensor besteht aus dem Verbund von Sender und multiplen Empfängern in einer stabilen mechanischen Anordnung (*Abbildung 5*). Durch diese wird die Mahd in die Maschine geführt und auf Fremdkörper untersucht. Die Sensoren (Empfänger) erzeugen, jeder für sich, durch die lokale Empfangsfeldstärke an ihrem Einbauort eine Spannung. Durch die Bewertung der einzelnen Feldstärken in zeitlichem Verlauf und Datenfusion werden Muster und Verläufe erkennbar.

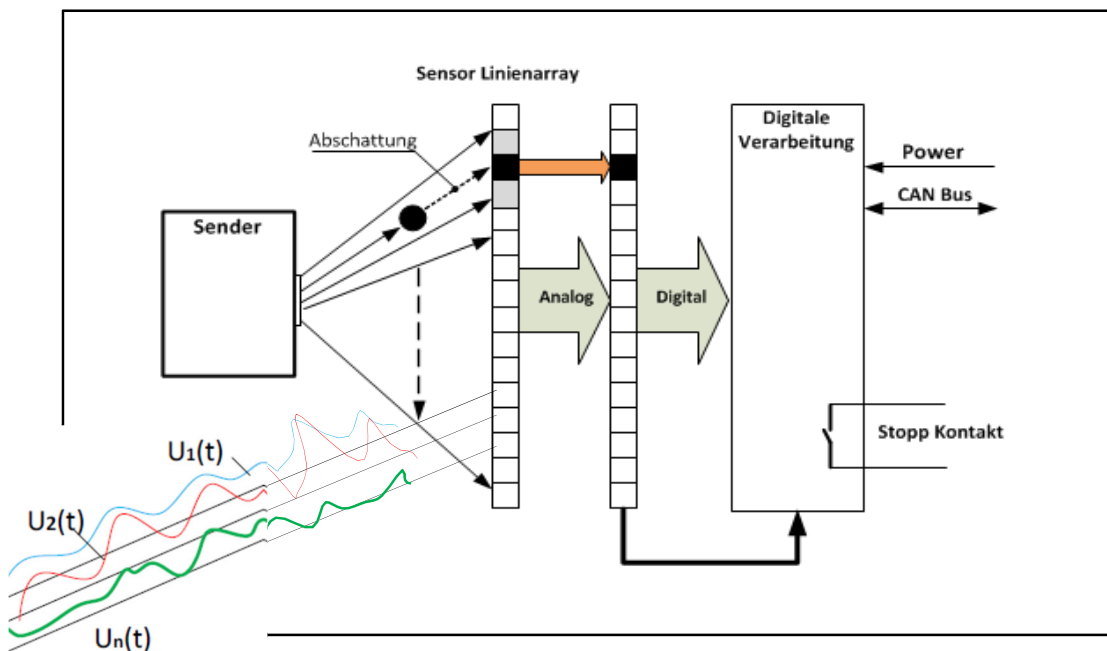


Abbildung 5: Funktionsprinzip des Detektionssystems EN 1808 Metallsensor (Prendel, 2018).

Im Labor ließen sich kleine Schrauben und eine 8 mm große Stahlkugel in einem künstlich hergestellten feldfreien Raum detektieren. Das belegt, dass auch Dinge „erkannt“ werden, die kleiner als die verwendete Wellenlänge sind. Die verwendete HF (Hochfrequenz) Leistung im Labor betrug ~ 10 mW an der Quelle und muss für die Versuche gesteigert werden. Außerhalb des Labors sind weitere Gegebenheiten zu beachten: Bei der Anwendung des Verfahrens entstehen, wie überall bei Funklinien, neben dem direkten Weg zwischen Sender und Empfänger auch Umwegsignale, die auch die Empfangseinrichtungen treffen. Dies ist eine Art „Stoffrauschen“ oder Interferenz zum direkten Signalweg.

Für einen ersten Test am Häcksler auf dem Feld, wird außer weiteren Anschaffungen und Softwareentwicklungen, auch die Mitarbeit von Fachfirmen benötigt, mit denen man bereits in Kontakt steht. Für die Vortests ist eine Summe im oberen fünfstelligen Bereich nötig, so schätzt der Erfinder.

Nach vorläufigen Schätzungen bewegt sich die erforderliche Senderleistung im einstelligen Wattbereich. Damit verbunden sind EMV (Elektromagnetische Verträglichkeit) Maßnahmen damit die angestrebte Anlage genehmigungsfähig wird. Wie hoch genau die benötigte Sendeleistung sein muss, ist zurzeit nicht bekannt.

Nach dem geplanten Versuch im Herbst 2019 ist nach Auswertung der Daten eine Prognose über die Leistungsfähigkeit des Sensors möglich. Die weitere Entwicklung wird durch den Testausgang bestimmt. Für den 1. Prototypen können Hardware und Software aus dem vorlaufenden Test verwendet werden (Prendel, 2018).

3.2.2 Projektarbeit: Fremdkörpererkennung im simulierten Maisbestand mittels Radartechnologie bei 24 GHz

In einer Projektarbeit im Studiengang Agrartechnik an der Fachhochschule Weihenstephan-Triesdorf untersuchten Studenten an einem simulierten Maisbestand, ob sich mit einem Radarsensor, welcher in einem Frequenzband von 24,05 bis 24,25 GHz operiert, metallische Fremdkörper erkennen lassen. Um den Maisbestand zu simulieren, wurde abgestorbener Spießknöterich (*Abbildung 6*), umwickelt mit nassen Papiertüchern, verwendet. Für die Messungen wurde ein Radarsensor SRR 208 der Firma Continental, welcher ursprünglich für die Erkennung von Hindernissen (Reichweite 50 m) im Straßenverkehr entwickelt wurde, an der Ladefläche eines Fendt GT angebracht (*Abbildung 6*). Aus einer Entfernung von 20 m wurde auf den simulierten Maisbestand zugefahren. Es erfolgte eine Doppelbestimmung. Als Fremdkörper wurden Stangen aus Aluminium, Messing, Edelstahl und Stahl mit einem Durchmesser von 10 mm eingesetzt sowie ein Winkelprofil (*Abbildung 6*).



Abbildung 6: Von links nach rechts: Abgestorbener Spießknöterich; verwendete Fremdkörper aus Aluminium, Messing, Edelstahl und Stahl; Radarsensor SRR 208 von Continental befestigt an der Ladefläche eines Fendt GT (HSWT, 2016).

Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen Reflexionspunkte ohne Fremdkörper im nassen und trockenem Bestand. In *Abbildung 9* und *Abbildung 10* sind die Reflexionspunkte mit der Winkelstange im Bestand aufgeführt, da dieser Versuchsaufbau zur höchsten Bündelung der Messwerte führte.

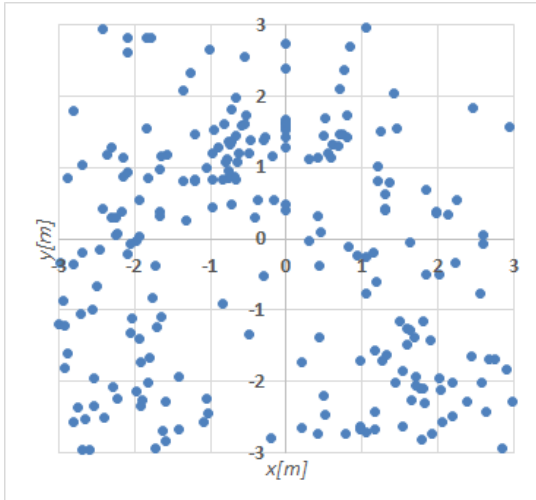


Abbildung 7: Reflexionspunkte eines trockenen Bestands ohne Fremdkörper (HSWT, 2016).

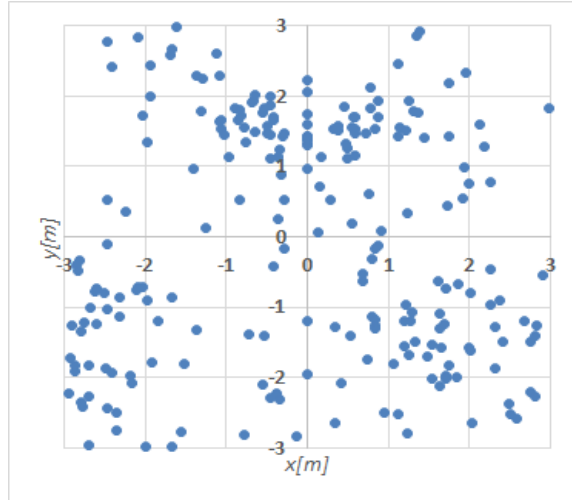


Abbildung 8: Reflexionspunkte eines nassen Bestands ohne Fremdkörper (HSWT, 2016).

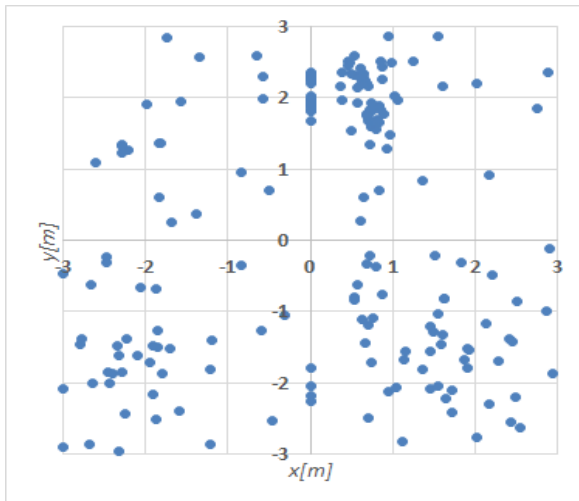


Abbildung 9: Messhäufung bei Zufahrt auf den **trockenen** simulierten Maisbestand, mit Winkelprofil im Bestand (HSWT, 2016).

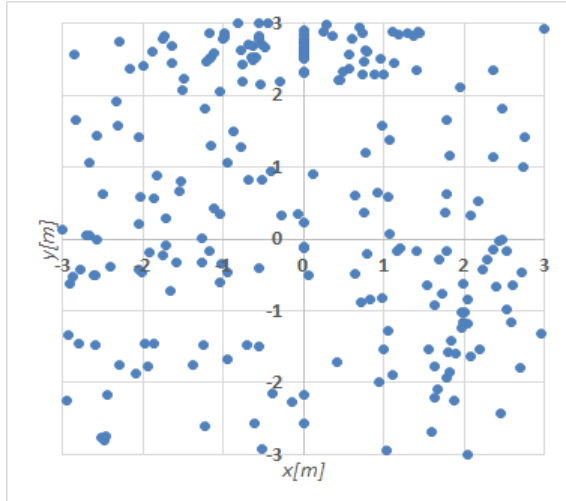


Abbildung 10: Messhäufung bei Zufahrt auf den **nassen** simulierten Maisbestand, mit Winkelprofil im Bestand (HSWT, 2016).

Tabelle 1: Auswertung der Streuung eines trockenen und nassen Bestands (HSWT, 2016).

Bestand	Messhäufigkeit visuell erkennbar?	
	Trocken	nass
Ja	23	15
Nein	3	11
Summe	26	26
% Ja	88,46153846	57,69230769
% Nein	11,53846154	42,30769231

Die Reflexionspunkte mit angebrachtem Fremdkörper sind im trockenen stärker gebündelt als im nassen Bestand (vgl. *Abbildung 9* und *Abbildung 10*).

Die Studenten kamen insgesamt zu dem Ergebnis, dass die simulierten Pflanzen wesentlich stärkere Reflexionswerte bei der getesteten Frequenz aufweisen als ein kleiner metallischer Fremdkörper. Insbesondere im nassen Bestand berichten sie von einer hohen Streuung, so dass ein sicheres Aufspüren der Fremdkörper nicht möglich war. Ebenfalls ist die Position des Sensors entscheidend. So führten Messungen mit horizontaler Position des Sensors gegenüber dem Bestand zu besseren Ergebnissen, da der Anteil der Fremdreflexion vom Boden geringer war (HSWT, 2016).

3.2.3 Untersuchung zur Fremdkörpererkennung im Maisfeld mittels Radartechnologie bei 1 - 4 GHz

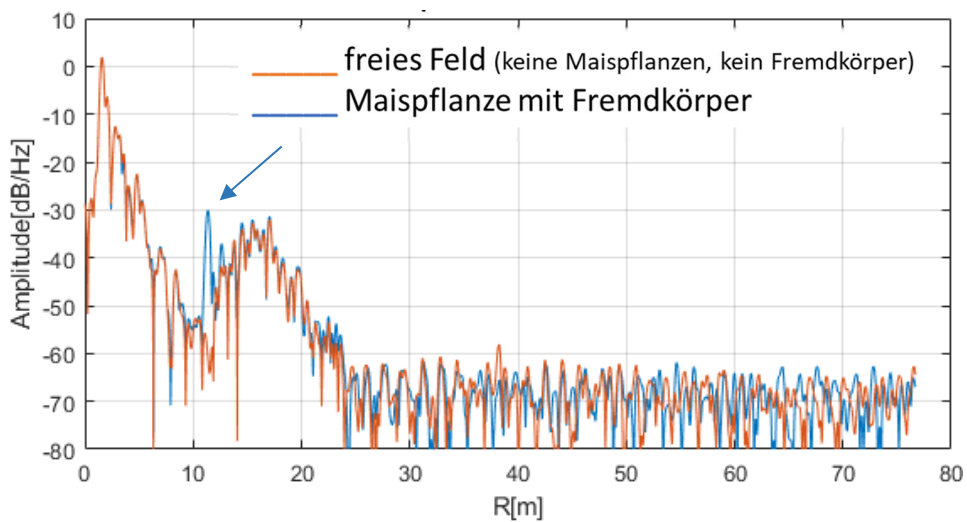
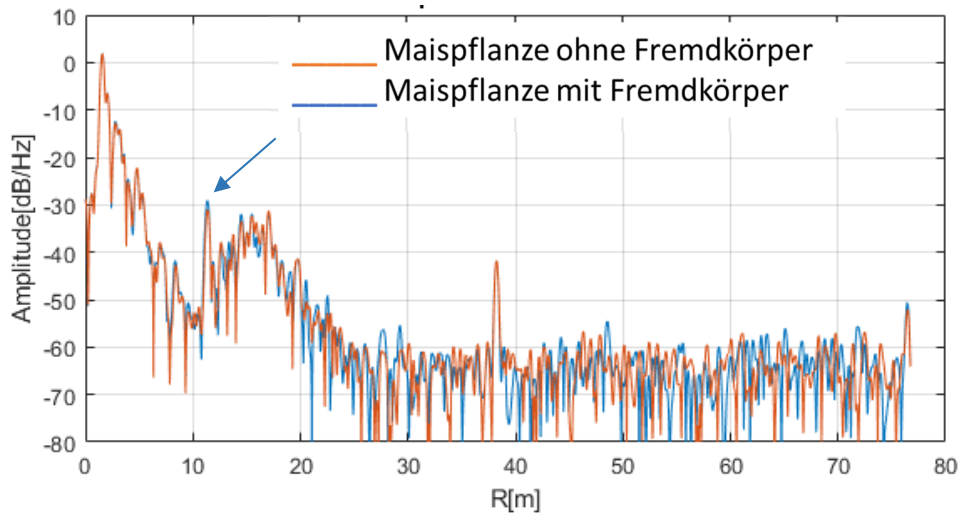
In der Fernerkundung ist erfahrungsgemäß bei Frequenzen von 1 bis 2 GHz die Vegetation weitgehend transparent. Mit einem Radarsystem, bereitgestellt vom Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, erfolgten Messungen mittels zwei Antennen (*Abbildungen 11* rechts), bei einer Frequenz von 1-4 GHz. Ein Fremdkörper (V2A-Stahl; $l = 10$ cm, $d = 3$ cm) wurde an einer Maispflanze befestigt und mittels einer Kunststoffstange im Maisfeld platziert (*Abbildungen 11* links). Gemessen wurde mit unterschiedlicher Entfernung zum Radarsensor (ca. 4, 10, 12, 30 m). Zum Vergleich erfolgten stets Messungen ohne Fremdkörper.



Abbildungen 11: Oben links: An einer Maispflanze befestigter Edelstahlstab, oben rechts und unten: Aufgestellte Radarantennen in einigen Metern Entfernung vom Maisfeld. Der Pfeil zeigt die ungefähre Position des Fremdkörpers an.



Abbildungen 12: Einzelne Pflanze auf dem Feld mit befestigten Fremdkörper in etwa 12 m Entfernung von den Radarantennen.



Abbildungen 13: Aufgenommene Signale bei 1-2 GHz. Oben: Signale einer Mispflanze im freien Feld ohne (rot) und mit Fremdkörper (blau) übereinandergelegt. Unten: Signal eines freien Feldes (rot) und einer Mispflanze mit Fremdkörper (blau).

Die Messungen im Feld (*Abbildungen 11*) bei den Frequenzen 1-4 GHz zeigten starke Signale der Maispflanzen. Ein Signal eines Fremdkörpers konnte unter den Signalen nicht differenziert werden. Die Signale der Maispflanzen und des Fremdkörpers überdeckten sich.

Wurde eine einzelne Pflanze gemessen, zeigte sich ein geringer Amplitudenunterschied bei den Messungen mit und ohne Fremdkörper von ca. 2 dB/Hz an der Position der Pflanze von ca. 12 m (*Abbildungen 13 oben*).

Beteiligte: Dr.-Ing. Julian Adametz, Arbeitsgruppenleiter "Radar and locating techniques"; Michael Stelzig, M.Sc., Wissenschaftlicher Mitarbeiter, beide vom Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg; Helena Wenzel, M.Sc.; Dr. Nicolas Alt.

3.2.4 Exkurs Radartechnik

In der Radartechnik werden mittels einer Antenne/Senders elektromagnetische Wellen ausgesendet. Treffen diese auf einen elektrisch leitenden Körper, werden sie reflektiert und können als Signal mit einer Antenne empfangen werden. Elektromagnetische Wellen breiten sich geradlinig und konstant mit annähernder Lichtgeschwindigkeit aus. Durch Messung der Laufzeit lässt sich so die Position des reflektierenden Objektes bestimmen. Je höher die Frequenz, desto höher ist die Auflösung und umso kleiner kann die Antenne sein. Die Wellenlänge ist reziprok proportional zur Frequenz (Formel 1) (radartutorial.eu).

Formel 1: Wellenlänge in Abhängigkeit der Frequenz.

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

λ = Wellenlänge, f = Frequenz, c = Lichtgeschwindigkeit = $3 \cdot 10^8$ m/s

Die Absorption elektromagnetischer Wellen durch Materie ist abhängig von der Wellenlänge. Mais weist einen Wasseranteil von bis zu 70 % auf, weshalb bei der Auswahl einer geeigneten Wellenlänge zur Detektion im Maisfeld die Reflexion von Wasser keine unwesentliche Rolle spielt. Die folgende Grafik zeigt die Reflexion von Wasser in Abhängigkeit der Wellenlänge.

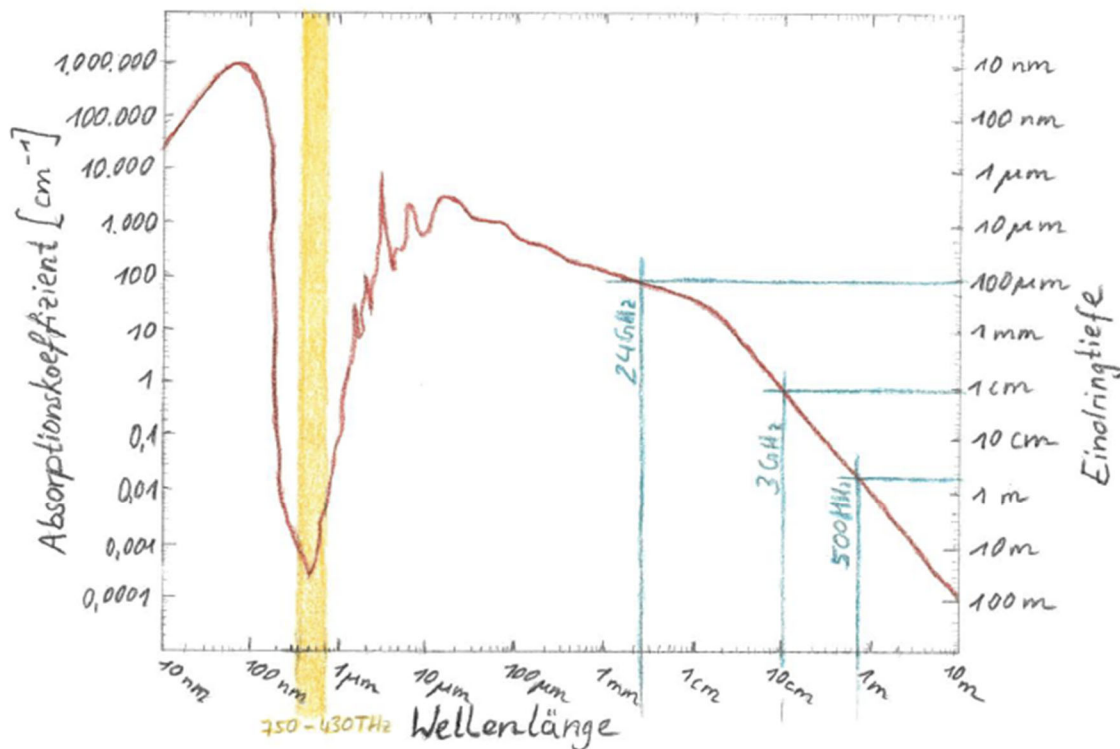


Abbildung 14: Nachbildung der Grafik von Segelstein (1981), welche den Absorptionskoeffizienten von Wasser in Abhängigkeit der Wellenlänge darstellt. Die Nachbildung enthält leichte Abweichungen gegenüber der ursprünglichen Grafik.

Ein hoher Absorptionskoeffizient steht im Zusammenhang mit einer hohen Reflexion und einer geringen Eindringtiefe - das Objekt ist „undurchsichtig“. Mit Wellenlängen des sichtbaren Lichts (gelb markiert: 400 - 700 nm bzw. 750 - 430 Terahertz) und ab einer Wellenlänge von 1 m (< 300 MHz) ist die Durchdringung der Strahlen in Wasser am höchsten.

3.3 Fremdkörperdetektion mittels Wirbelstromtechnik

3.3.1 Wirbelstromtechnik

Werden leitfähige Materialien einem sich zeitlich ändernden Magnetfeld ausgesetzt entstehen Wirbelströme. Die zeitliche Veränderung des Magnetfeldes kann durch Veränderung der Magnetfeldstärke erfolgen oder durch die Bewegung des leitfähigen Körpers oder des Magnetfeldes. Für das Entstehen der Wirbelströme muss das Material nicht ferromagnetisch sein, es reicht die Leitfähigkeit des Materials aus (Kötter, Schmoldt, & Winkelmann, 2016); (elektronik-kurs.net).

3.3.2 Erkennung von Edelstahl im Maisfeld und an der Maschine mittels Metalldetektor

Viele Metalldetektoren funktionieren mittels Wirbelstromtechnik. Um diese Technik im Maisfeld zu testen wurde ein handelsüblicher Metalldetektor (Teknetics eurotek pro) verwendet. Dieser besitzt 2 Spulen und hat eine Arbeitsfrequenz von 7,8 kHz. Eine 5 cm lange V2A-Schraube (D = 1 cm), welche hinter einem Maiskolben platziert wurde, erzeugte ein Signal aus ca. 25 cm Entfernung (Abbildung 15). Ein größerer Metallbolzen von 20 cm Länge (D = 1 cm) konnte aus ca. 35 cm Entfernung hinter einem Maiskolben detektiert werden.

Um zu testen ob rotierende Metallteile die Detektion beeinflussen, wurde ein Metallbolzen (20x1 cm), an einen Holzstab befestigt und in einen laufenden Maishäcksler mit sich rotierenden Vorpresswalzen gehalten. Die Rotation der Vorpresswalzen erzeugte zwar Signale im Metalldetektor, jedoch war das vom Fremdkörper induzierte Signal stärker. Auch hier konnte aus ca. 20 cm Entfernung der Fremdkörper erkannt werden. Die unbeweglichen Metallteile des Maishäckslers erzeugten hingegen kein Signal.



Abbildung 15: Erkennung der V2A-Schraube mittels Metalldetektor aus ca. 25 cm Entfernung.

3.3.3 Integration eines Metalldetektors in die Feldspritze oder den Leichtstelzenschlepper

Ein Metalldetektor könnte entweder in den Häcksler oder an ein anderes Fahrzeug, welches durchs Maisfeld fahren kann, wie die Feldspritze oder den hier nun vorgestellten Leichtstelzenschlepper, integriert werden.

Der Leichtstelzenschlepper mit Elektroantrieb (*Abbildung 16*) wurde von Ingenieuren der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg zusammen mit der Firma BIOCARE, einem Hersteller für biologische Pflanzenschutzmittel, vor ein paar Jahren entwickelt. Mit dem Leichtstelzenschlepper können Maislandwirte über das meterhohe Feld fahren und biologische Pflanzenschutzmittel aufbringen. Auf diese Weise ist die Ausbringung von biologischen Schädlingsbekämpfungsmitteln erleichtert und es lassen sich 24 Hektar pro Stunde bearbeiten (top agrar online, 2017). Derzeit gibt es einen Prototyp. Für die Serienreife laufen die Entwicklungen.



Abbildung 16: Der Stelzenschlepper bei der Einfahrt ins Maisfeld, Bild: BIOCARE GmbH, top agrar online, 2017.

4 Entwicklungen zur Detektion von Minen im Boden

4.1 Radartechnik zur Minensuche

4.1.1 Minensuche mittels eines tragbaren Systems

Mehrere Forscherteams, darunter Forscher des Lehrstuhls für Hochfrequenzsysteme der RUB (Ruhr-Universität Bochum) sowie der TU Ilmenau, entwickelten eine Detektionsmethode mittels Bodenradar, um Plastik-, Holz- und Keramikminen im Boden aufzuspüren. Gefördert wurde das Projekt bis 2017 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft.

Das System ist so aufgebaut, dass zwei Antennen im rechten Winkel zueinanderstehen und somit ein horizontales und ein vertikales elektrisches Feld entsteht. Die Arbeitsfrequenz beträgt 500 MHz bis 4 GHz. Verdächtige Objekte lassen sich an der Ausdehnung, Tiefe und Amplitude der Radarwellen erkennen. Die Rückstreuung der Objekte im Boden beeinflusst auch die Polarisation auf eine typische Art und Weise.

Mit ihrem Bildgebungsverfahren filtern die Forscher das störende Echo der Erdschichten heraus und schieben die unfokussierten Kurven der Funde zu punktförmigen Objekten zusammen. Deren Signale vergleichen sie mit Mustern verschiedener Minentypen und anderer Gegenstände, welche sie im Vorfeld vermessen haben (VDI Nachrichten, 2016).

4.1.2 Minensuche auf dem Gelände mit größerem Flächendurchsatz

Ebenfalls an der Minendetektion forscht das Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR). Das System TIRAMI-SAR soll zügig große Flächen absuchen. Auf einem Kleinlaster sind sechs Radarantennen und die Radarelektronik montiert. Die Antennen strahlen zur Seite hin aus, während der Laster sich auf einem sicheren Terrain am Rande des Minenfeldes bewegt (Abbildung 17). Auf diese Weise können ca. 100 m² innerhalb von 3 min gescannt werden. Die Entwicklung war Teil des vierjährigen mit 900 000 € finanzierten EU-Projektes Tiramisu

(Toolbox implementation for removal of anti-personnel mines, submunitions and unexploded ordnance), welches Ende 2015 abgelaufen ist (VDI Nachrichten, 2016).



Abbildung 17: Kleinlaster mit sechs Radarantennen zur Minendetektion (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), 2016).

Zwei Sende- und vier Empfangsantennen sind übereinander schräg zum Boden angeordnet. Sie arbeiten ebenfalls im unteren Mikrowellenbereich, bei 500 MHz bis 3 GHz, die Eindringtiefe in den Boden beträgt dabei bis 20 cm, je nach Bodenart und Feuchte auch etwas mehr oder weniger (Peichl, 2016). Genutzt wird ein Radar mit synthetischer Apertur (SAR), eine Technologie, die man hauptsächlich bei Satelliten- oder Flugzeugaufnahmen verwendet.

Die Antennengruppe liefert zweimal vier unabhängige Radarbilder. Sie unterscheiden sich durch die leicht abweichenden Einfallswinkel und werden bei der Verarbeitung nach speziellen Verfahren überlagert. Die Objektsignatur wird dadurch deutlicher im Vergleich zum Hintergrund. Zusätzlich wird Wellenpolarisation beim Senden und Empfangen verwendet, was weitere Informationen liefert (VDI Nachrichten, 2016). Die räumliche Auflösung beträgt 5 - 10 cm, so dass sich auch Plastikminen mit einem Durchmesser von 5 cm aufspüren lassen (Peichl, 2016).

4.1.3 Minensuche mittels Radar-Drohne

Seit Anfang 2016 arbeiten die Universität und die Hochschule Ulm gemeinsam mit der Fachhochschule Nordwestschweiz im Projekt FindMine an einer Radardrohne zur Minensuche. Finanziert wird das Projekt für drei Jahre von der Urs-Endress-Stiftung.

Auch hier wird Bodenradar mit relativ geringer Frequenz eingesetzt. Aus vielen Messungen entlang der Drohnen-Flugbahn wird ein hochaufgelöstes Bild generiert. Mit Bildverarbeitung und Mustererkennung mit speziellen Algorithmen kann auf die Art des Objekts und seine zentimetergenaue Position geschlossen werden. Ein wichtiger Schwerpunkt der Forschungsarbeit ist die Radar-Signalprozessierung (pro-physik.de, 2016).

4.2 Wirbelstrom zur Minensuche

Mit elektromagnetischen Systemen können elektrisch leitfähige Körper und somit alle Arten von Metallen, magnetische und nichtmagnetische, erfasst werden (Kötter, Schmoldt, & Winkelmann, 2016). Bei der Elektromagnetik handelt es sich um Zweispulensysteme (Abbildung 18), deren Funktionsprinzip auf Induktion beruht. Die Zweispulensysteme setzen sich aus einer Sende- und einer Empfangsspule zusammen. Bei der Messung erzeugt ein Wechselstrom in der Sendespule ein sogenanntes primäres Magnetfeld. In leitfähigen Störkörpern werden durch das Wechselfeld elektrische Wirbelströme angeregt, die wiederum ihr eigenes (sekundäres) Magnetfeld erzeugen. Mit der Empfangsspule können die sekundären Magnetfelder registriert werden (K.A. Tauber Spezialbau GmbH & Co. KG).

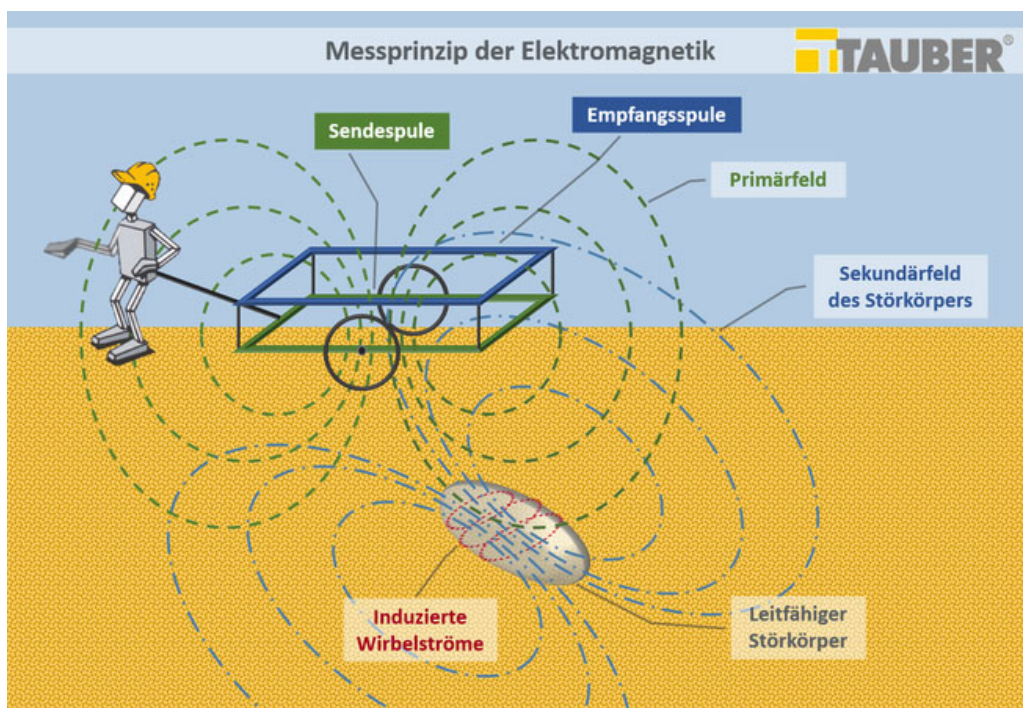


Abbildung 18: Messprinzip der Elektromagnetik (K.A. Tauber Spezialbau GmbH & Co. KG).

5 Diskussion

5.1 Fremdkörperdetektion mittels Röntgenstrahlung

- + Vorteilhaft bei dem System ist, dass die Detektion verschiedenster Materialien möglich ist und nicht nur auf metallische Fremdkörper beschränkt ist.
- Allerdings konnten kleine Fremdkörper nicht zuverlässig erkannt werden, womit noch weitere Optimierungsarbeit notwendig ist, wie es im Abschlussbericht des Projektes hieß.
- Nachteilig ist die Gefahr, welche von Röntgenstrahlen ausgehen kann. Zum Strahlenschutz ist sowohl ein baulicher als auch ein behördlicher Aufwand notwendig, denn die Inbetriebnahme einer Röntgenanlage muss durch einen behördlichen Gutachter begleitet werden und ist erst nach Genehmigung durch eine Behörde möglich. Zudem kann es notwendig sein, die Mitarbeiter im Betrieb speziell für den Umgang mit einer Röntgenanlage auszubilden. John Deere selbst schreibt

in seinem Abschlussbericht sinngleich dazu, dass aufgrund der aktuellen Röntgenverordnung ein konkreter Ausblick auf eine Markteinführung der Röntgensensorik schwierig sei.

- Insgesamt ist der Aufbau der Anlage im Einzugskanal komplex, was sich auf den Preis niederschlägt (*John Deere GmbH & Co. KG, 2015*). Nicht nur der Preis, auch das Gefahrenpotential von Röntgenstrahlen könnte solch eine Anlage für den Kunden unattraktiv werden lassen.

Die zwei Hauptgründe gegen eine Röntgenanlage im Feldhäcksler sind nach derzeitigem Stand:

- Die hohen Kosten einer Röntgenanlage
- Die Schwierigkeit zwischen einer echten Störung und verdichtetem Pflanzenmaterial zu unterscheiden (Wild K. , Prof. Dr. agr., 2019).

5.2 Fremdkörperdetektion mittels Radarstrahlung

Bei höheren Frequenzen (> 4 GHz) ist deutlich der Einfluss von Biomasse/Pflanzen auf Radarbildern der Fernerkundung zu erkennen. Dies liegt unter anderem an der höheren Reflexion von Wasser zwischen Wellenlängen von ca. 1 µm – 5 cm bzw. 300 THz – 6 GHz (*Abb. 14*). Das erklärt warum in der Projektarbeit (*Kap. 3.2.2*) bei 24 GHz ein Signal eines Fremdkörpers zwischen den Signalen der Pflanzen nicht zu identifizieren war.

Bei Frequenzen von 1 bis 2 GHz ist erfahrungsgemäß die Vegetation weitgehend transparent. Allerdings konnte mit einem einfachen Aufbau auch bei 1 bis 4 GHz (*Kap. 3.2.3*) ein Fremdkörper nicht ohne Weiteres im Maisfeld erkannt werden.

Bei der Minensuche werden Frequenzen von 500 MHz bis 4 GHz eingesetzt. Im Falle der Minensuche mit dem Kleintransporter (*Kap. 4.1.2*), sind die Antennen einige Meter oberhalb des Bodens angebracht, die Eindringtiefe in den Boden der ausgesendeten Strahlung beträgt bis zu 20 cm und es können auch Plastikobjekte mit einem Durchmesser von 5 cm mit einer Positionsgenauigkeit von 5 - 10 cm detektiert werden.

- + Die Bedingungen für eine Detektion im Maisfeld mittels Radar vom Maishäcksler aus sind ähnlich. Auch hier wären die Antennen einige Meter vom Maisfeld entfernt und die ausgesendete Strahlung sollte mindestens einige Zentimeter weit in den Bestand reichen.
- + Anders als bei der Minensuche, bei der die Böden, der Bewuchs als auch die Fremdkörper stark variieren können, ist die Umgebung Maisfeld recht gleichbleibend. Auch muss nicht nach Fremdkörpern (gefährlich oder ungefährlich) unterschieden werden, sondern es sollten ab einer gewissen Größe alle im Maisbestand vorkommenden Fremdkörper detektiert werden.

Da eine Minendetektion einige Herausforderungen mehr birgt und dennoch funktioniert, ist es gut vorstellbar, dass durch eine Kombination aus einer geeigneten Frequenz und Polarisation, sowie passenden Detektionsalgorithmen und Erkennungsmuster ein Fremdkörper im Mais mittels Radar detektiert werden kann.

- + Abhängig davon wie positionsgenau die Detektion im Maisfeld erfolgen kann, könnte es für den Landwirt leichter und daher vorteilhafter sein den Fremdkörper im Maisfeld anstatt aus der Maschine zu entfernen.

- Nachteilig bei der Radartechnik ist der Platzbedarf für die Antennen. Diese haben eine gewisse Größe, abhängig von verschiedenen Faktoren, und müssten auf den Maishäcksler so angebracht werden, dass sie den Ernteprozess nicht stören.

5.3 Metallsuchtechnik zur Fremdkörpererkennung im Mais

Mit einem Metalldetektor lassen sich kleine Objekte von 5 cm problemlos noch mit einem Abstand von bis zu ca. 30 cm detektieren. Bei dem einfachen Versuchsaufbau von *Kap. 4.1.1*, konnte ein Fremdkörper trotz rotierender Metallteile mittels der Wirbelstromtechnik zwischen den Falschsignalen erkannt werden. Um Fehlmeldungen zu minimieren, könnte über Ferrite und der Anordnung der Spulen das Magnetfeld so angeordnet werden, dass die Messung durch den Häcksler nicht gestört wird. Dies müssten allerdings weitere Versuche ggf. in einem dafür entwickelten Prüfstand klären.

- Nachteilig ist, dass diese Methode eine Nahfeldmethode ist und daher im Erntefluss des Maishäckslers verbaut werden muss. Aus der Luft mit z.B. einer Drohne lassen sich mit einem Metalldetektor kleine Objekte von 5 cm aus 3 m Entfernung nicht erkennen.
- + Um der Integration des Detektors in den Häcksler und damit verbundenen Schwierigkeiten, wie rotierenden Metallteilen zu entgehen, wäre eine weitere Möglichkeit den Metalldetektor in das entwickelte E-Mobil für die Landwirtschaft (*Kap. 3.3.3*) oder eine Feldspritze einzubauen und mit diesem vor der Ernte die Felder abzufahren.

5.4 Vor- und Nachteile der möglichen Detektionsmethoden zusammengefasst

Der Vorteil der Röntgen und Radartechnik ist, dass sich auch nicht metallische Fremdkörper detektieren lassen. Die Radartechnik ist eher eine Methode für die Detektion im Voraus im Maisbestand, während die Röntgen- und Metallsuchtechnik im Maishäcksler im Einzugskanal integriert werden müssen. Ein Einbau der Metallsuchtechnik in ein E-Mobil oder eine Feldspritze wäre wahrscheinlich keine große technische Herausforderung allerdings würde es einen zeitlichen Mehraufwand für den Landwirt bedeuten, der vor der Ernte das Feld zur Detektion extra abfahren müsste. Der große Nachteil der Röntgentechnik ist die mögliche Gefahr, die von solch einer Strahlung ausgeht und der damit verbundene technische und behördliche Aufwand, was sich auf den Preis niederschlägt und zusammen mit der potentiellen Gefahr die Akzeptanz beim Kunden erniedrigt. Insgesamt ist in Tabelle 2 auf den ersten Blick zu erkennen, dass die Röntgentechnologie in vorliegender Anwendung bei den bewerteten Aspekten die meisten Nachteile aufweist. Während die Radartechnik zwei große Vorteile hat: die mögliche Detektion von Fremdkörpern verschiedener Materialien ohne die Gefährdung des Landwirts, und die Möglichkeit der Detektion im Voraus, bevor der Fremdkörper in die Maschine gelangt, was gleichzeitig den Vorteil der möglichen Systemintegration schon angeschaffter Maishäcksler bietet, ohne den erforderlichen Umbau im Erntekanal.

Tabelle 2: Bewertung der Techniken nach einzelnen Aspekten.

	Röntgen	Radar	Wirbelstrom
+	Detektionsspektrum	Detektionsspektrum	Einfache Technik
	Fortgeschrittene Entwicklung	Fortgeschrittene Entwicklung	Integration ins E-Mobil/Feldspritze
	Erfassung von 20x60 cm	Detektion vor dem Häcksler	Erfassung von 20x60 cm
-	Integration im Erntekanal	Erfassung von 6x3 m	Integration im Erntekanal
	Gefahrenpotential	Platzbedarf für Antennen	Detektionsspektrum
	Komplexe Anlage		
	Preis		
	Akzeptanz		

6 Danksagung

Vielen Dank an den Arbeitsgruppenleiter "Radar and locating techniques" Dr.-Ing. Julian Adametz für die Bereitstellung eines Radarsystems und die fachliche Unterstützung sowie dem wissenschaftlichen Mitarbeiter Michael Stelzig, M.Sc., für die Durchführung und fachliche Beurteilung der Radarversuche im Maisfeld (Kap. 3.2.3). Beide sind vom Lehrstuhl für Hochfrequenztechnik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg. Vielen Dank an Herr Peter Prendel der Firma SensKom aus Weyhe bei Bremen für die Informationen zu seiner Entwicklung zur Störkörper Sensierung durch Dielektrika-Diskriminierung (Kap. 3.2.1). Vielen Dank an meinen Kollegen Jens Wolf, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Biomasse-Institut, der die Versuche mittels Metalldetektor (Kap. 3.3.2) mit durchführte und seinen Metalldetektor zur Verfügung stellte.

7 Literaturverzeichnis

Bundesamt für Strahlenschutz(kein Datum). Abgerufen am 09. 07 2019 von Bundesamt für Strahlenschutz: http://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/natuerliche-strahlenbelastung/natuerliche-strahlenbelastung_node.html

Bundesamt für Strahlenschutz. (kein Datum). Abgerufen am 09. 07 2019 von <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/strahlenschutz/grenzwerte/grenzwerte.html>

Claas. (kein Datum). www.claas.de. Abgerufen am 04. 07 2019 von https://www.claas.de/produkte/feldhaecksler/jaguar870-840/gutfluss?subject=CVG_de_DE

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). (22. 02 2016). *Landminen schneller aufspüren dank Radar*. Abgerufen am 30. 07 2019 von https://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151_read-16805/#/gallery/22094

elektronik-kurs.net. (kein Datum). Abgerufen am 29. 10 2018 von <http://elektronik-kurs.net/elektrotechnik/wirbelstrom/>

HSWT. (2016). *Fremdkörpererkennung im simulierten Maisbestand mittels Radartechnologie.* Hochschule Weihenstephan-Triesdorf. Johannes Fuchs, Markus Deffner, Markus Tischhöfer.

John Deere GmbH & Co. KG. (2015). *Fremdkörpererkennung und Durchsatzermittlung im selbstfahrenden Feldhäcksler mit Hilfe von Röntgenstrahlung.* Abschlussbericht.

Johnson, S. J. (1996). *Patentnr. EP 0 702 248 A2.*

K.A. Tauber Spezialbau GmbH & Co. KG. (kein Datum). *Tauber.* Abgerufen am 22. 10 2018 von <http://www.munition.de/kampfmittelraeumung/kampfmitteldetektion/elektromagnetik.htm>

Kötter, M., Schmoldt, J.-P., & Winkelmann, K. (2016). *Detektionsverfahren in der Kampfmittelräumung.* Berlin: Ingenieurtechnischer Verband für Altlastenmanagement und Flächenrecycling e.V. (ITVA).

Peichl, M. (2016). Dr. Abgerufen am 18. Oktober 2018 von <https://soundcloud.com/dlf-wissenschaft/bodenradar-fur-minensuche-dlr-forscher-testen-neues-detektionssystem>

Prendel, P. (2018). *EN 1808 Metallsensor, Störkörper Sensierung durch Dielektrika-Diskriminierung (S2D2).* SensKom.

pro-physik.de. (01. November 2016). Abgerufen am 15. Oktober 2018 von http://www.pro-physik.de/details/news/10032861/Minensuche_mit_Radar-Drohnen.html

radartutorial.eu. (kein Datum). Abgerufen am 29. 10 2018 von <http://www.radartutorial.eu/01.basics/Physikalische%20Grundlagen%20des%20Radarprinzips.de.html>

Segelstein, D. j. (1981). *The complex refractive index of water.*

top agrar online. (26. 05 2017). E-Mobil für die Landwirtschaft. *Stefanie Awater-Esper.* Abgerufen am 22. 10 2018 von <https://www.topagrar.com/news/Acker-Agrarwetter-Ackernews-E-Mobil-fuer-die-Landwirtschaft-8288587.html>

VDI Nachrichten. (3. Juni 2016). Scharfer Blick durch das Minenfeld. *Jordanova-Duda, Matilda.*

Weiß, B., & Schulze, K. (1997). *Deutschland Patentnr. DE 196 20 526 A1.*

Wild, K. (2016). *Fremdkörpererkennung und Durchsatzermittlung im selbstfahrenden Feldhäcksler mit Hilfe von Röntgenstrahlung.* HTW Dresden, ZAFT e.V.

Wild, K. (2019). Prof. Dr. agr. (H. Wenzel, Interviewer)

Wild, K. J., & et al. (2015). X-ray Technique for Simultaneous Mass Flow Measurements and Foreign Body Detection in a Self-Propelled Forage Chopper. *2015 Annual International Meeting (S. 19).* New Orleans, Louisiana: ASABE.